

# Hochleistungsbetone mit erhöhtem Säurewiderstand für den Kühlturmbau

Von Ludger Lohaus und Lasse Petersen, Hannover

## 1 Einleitung

Seit den 80er Jahren wurde in Kohlekraftwerken damit begonnen, den Kühlturm nicht allein nur zur Wasserkühlung zu nutzen, sondern gleichzeitig auch gereinigte Abgase über den Kühlturm abzuführen. Im Modellkraftwerk Völklingen wurde Anfang der 80er Jahre eine Rauchgasentschwefelungsanlage in den Kühlturm integriert. Die gereinigten Abgase wurden mit den Kühlturmschwaden vermischt und mit ihnen gemeinsam über den Kühlturm abgeleitet.

Das Kondensat, das sich auf der Innenseite der Kühlturmschale niederschlägt, weist dabei teilweise pH-Wer-

te bis etwa 3,5 auf, was einen sehr starken chemischen Angriff > XA3 darstellt. In der Vergangenheit wurden die Kühlturminnenseiten daher mit einem Beschichtungssystem versehen.

Ein solches Beschichtungssystem verursacht nicht unerhebliche Kosten im Rahmen der Erstellung. Es ist aber auch mit Aufwendungen für die Instandhaltung und Erneuerung der Beschichtung während der Betriebszeit zu rechnen [1]. Daher kam Mitte der 90er Jahre der Gedanke auf, durch umfassende betontechnologische Maßnahmen einen Hochleistungsbeton herzustellen, der es erlaubt, auf eine Beschichtung des Kühlturms zu verzichten [2].

Ein solcher Hochleistungsbeton mit erhöhtem Säurewiderstand wurde Ende der 90er Jahre zunächst im Labor entwickelt und anschließend im Jahr 1999 beim Bau des 200 m hohen Kühlturms der RWE AG in Niederaußem umgesetzt [3]. Bei diesem Kühlturm wurde eine spezielle Zusammensetzung aus Zement und Betonzusatzstoff, nämlich Portlandzement, Flugasche und Mikrosilika, eingesetzt. Diese betontechnologische Vorgehensweise galt über längere Zeit als erforderlich für die Herstellung eines solchen Betons mit erhöhtem Säurewiderstand.

Derzeit werden in Deutschland weitere Kühltürme mit Abgaseinleitung geplant und gebaut (z.B. in Boxberg und in Datteln), bei denen unter Verwendung eines Hochleistungsbetons mit erhöhtem Säurewiderstand auf zusätzliche Schutzmaßnahmen verzichtet wird. Aufgrund der Vielzahl von derzeit auszuführenden sowie geplanten Kühlturmprojekten wurde von Seiten der Baufirmen sowie der Zement- und Zusatzstoffindustrie ein großer Aufwand betrieben,



Bild 1: Neubau eines Naturzugkühlturms in Boxberg

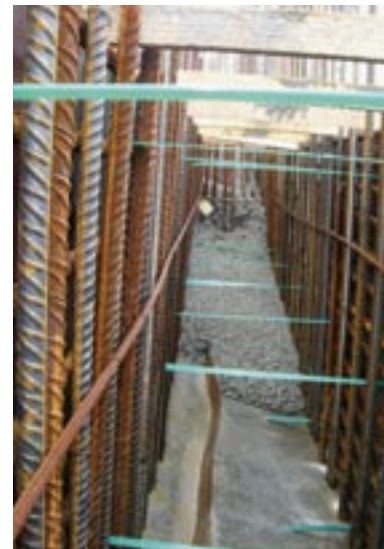


Bild 2: Einbau des Hochleistungsbetons mit erhöhtem Säurewiderstand in die Kühlturmwand

Betone mit erhöhtem Säurewiderstand weiterzuentwickeln [4]. So gibt es mittlerweile betontechnologisch deutlich mehr Möglichkeiten, einen solchen Beton zu konzipieren, als es im Rahmen der Betonentwicklung für die Erstanwendung in Niederaußen vermutet wurde.

Beispielsweise wird für den Naturzugkühlturm in Boxberg ein Portlandhüttenzement CEM II/B-S 42,5 R eingesetzt. Bild 1 und 2 zeigen Aufnahmen der Bauphase dieses Kühlturms.

Auch wenn bislang noch keine Betonzusammensetzungen mit Hochofenzementen für derartige Kühlturmprojekte eingesetzt wurden, so werden dennoch immer wieder solche Bindemittel in die Ausführungsüberlegungen mit einbezogen und es scheint, als sei es lediglich noch eine Frage der Zeit, bis auch Hochofenzemente für derartige Projekte eingesetzt werden. Beispielsweise liegt ein Vorteil dieser Zemente in der helleren Betonoberfläche gegenüber Portlandzementen (speziell gegenüber Portlandzement mit HS-Eigenschaft).

Im vorliegenden Beitrag wird die betontechnologische Herangehensweise für die Entwicklung eines Betons mit erhöhtem Säurewiderstand dargestellt, wobei speziell über Erfahrungen von Kombinationen aus Hochofenzement und Flugasche berichtet wird. Dabei wird zunächst ein neuartiger Prüfstand vorgestellt, der für die Durchführung von Parameterstudien zum Säurewiderstand entwickelt wurde. Weiterhin werden die unterschiedlichen mikroskopischen Auswertmöglichkeiten dargestellt. Mit dem neu entwickelten Prüfstand wurden diverse Untersuchungen zu verschiedenen Mörtel- bzw. Betonzusammensetzungen durchgeführt, wobei im

vorliegenden Bericht schwerpunktmäßig Betonzusammensetzungen mit hüttensandhaltigen Zementen und Betonzusatzstoffen vorgestellt werden.

## 2 Grundlagen zum Säurewiderstand von Beton

Dem betontechnologischen Konzept zur Erzielung eines erhöhten Säurewiderstands liegen zwei Prinzipien zugrunde.

Zum einen soll ein dichter Beton hergestellt werden, bei dem die Gesteinskörnung eine möglichst dichte Packung aufweist, da so ihr Anteil an beständigerer Gesteinskörnung am Betonvolumen maximiert wird. Bei derartigen Betonen werden gegebenenfalls sogar die Normvorgaben hinsichtlich des Mindestzementgehalts unterschritten, die dann allerdings nur mit einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung verwendet werden dürfen.

Zum anderen muss die Bindemittelmatrix einen möglichst hohen Widerstand gegenüber lösenden und treibenden Angriffen aufweisen. Der Widerstand eines Betons gegenüber Säureangriff wiederum hängt im Wesentlichen von der Zusammensetzung des Bindemittels ab.

Als wichtiger Beitrag zur Erhöhung des Säurewiderstands dienen die Begrenzung des  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Gehalts sowie eine feine Verteilung der  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Partikel. Bei reinem Portlandzement als Bindemittel bildet sich nämlich üblicherweise ein dreidimensional vernetztes  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Gerüst aus, wodurch der Säureangriff schnell in tiefere Betonschichten vordringen kann [5]. Durch die Wirkung der feinen Zusatzstoffpartikel als Kristallisationskeime verteilt sich das ausfallende  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  mikrokristallin in der

Zementmatrix und es bildet sich, anders als bei reinem Portlandzement als Bindemittel, kein dreidimensional zusammenhängendes  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Gefüge aus.

Der Wirkungsmechanismus der Zusatzstoffe, der für die Umwandlung von  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  in CSH-Phasen verantwortlich ist, ist die latent-hydraulische bzw. die puzzolanische Reaktion, bei denen die Zementhauptbestandteile bzw. die Betonzusatzstoffe, die sich durch einen hohen Glasgehalt auszeichnen, durch den hohen pH-Wert der Porenlösung (ca. pH 13,2 bis pH 13,6) gelöst werden und deren Bestandteile (zum größten Teil gelöstes Silizium und Aluminium) mit dem Calciumhydroxid unter Bildung von CSH-Phasen reagieren.

Dementsprechend wurden schon früher beim Bau von Kühltürmen Hochofenzemente mit hohem Hüttensandgehalt eingesetzt, da mit diesen Zementen ein betontechnologisch vertretbarer Kompromiss zwischen Verarbeitbarkeit, Frühfestigkeit und chemischem Widerstand erreicht werden konnte [6–10].

Bei der Erstanwendung zur unbeschichteten Bauweise eines Kühlturms mit Abgaseinleitung aus Beton mit erhöhtem Säurewiderstand in Niederaußen wurde ein Portlandzement in Kombination mit den Betonzusatzstoffen Flugasche und Mikrosilika eingesetzt. Vor allem dem Zusatzstoff Mikrosilika wurde dabei eine große Bedeutung zur Erhöhung des Säurewiderstands zugeschrieben. Dies liegt hauptsächlich darin begründet, dass Mikrosilika eine wesentlich höhere Reaktivität im Vergleich zu Hüttensand und Flugasche aufweist. Die hohe Reaktivität von Mikrosilika ist eine Folge ihrer größeren Feinheit und ihres hohen reaktiven Glasgehalts (durchschnittlich

≥ 95 % gegenüber 60 % bis 95 % bei Steinkohlenflugasche). Durch die höhere Reaktivität von Mikrosilika wird mehr  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  in CSH-Phasen umgewandelt als durch Steinkohlenflugasche bzw. Hüttensand.

Neben der Kombination und dem Bindemittelgehalt im Beton ist vor allem der Wasserzementwert (w/z-Wert) bzw. die Dichtigkeit des Zementsteingefüges für den Säurewiderstand entscheidend. Im Allgemeinen werden dabei  $(w/z)_{\text{eq}}$  von etwa 0,40 bis 0,42 eingesetzt.

Für aktuelle Kühlturmprojekte aus Beton mit erhöhtem Säurewiderstand wurden in jüngster Zeit unterschiedliche Kombinationen aus Hochofenzementen und Flugasche entwickelt und erfolgreich in Laboruntersuchungen geprüft.

Es zeigte sich, dass mit diesen Kombinationen aus Hochofenzementen und Flugasche (und Feinstflugasche) teilweise ein höherer Säurewiderstand erreicht wurde als mit der bislang verwendeten Betonzusammensetzung mit Portlandzement, Flugasche und Mikrosilika (siehe hierzu Abschnitt 4).

### 3 Konzeption eines Versuchsaufbaus für Parameterstudien zum Säurewiderstand

Der nachfolgend beschriebene Prüfstand wurde speziell für vergleichende Untersuchungen zum Säurewiderstand von Beton entwickelt, mit dem Ziel, möglichst viele Probekörper unter exakt den gleichen Randbedingungen zu prüfen [11].

Für ein Prüfverfahren zur Dauerhaftigkeit ist es zunächst wünschenswert, einen Zeitraffereffekt für den Schädigungsfortschritt zu erzeugen. Die Intensität des Säureangriffs rich-

tet sich dabei in erster Linie nach dem pH-Wert, so dass dieser im Sinne eines Zeitraffereffektes möglichst niedrig eingestellt werden sollte. Dabei darf der Angriff jedoch nicht derart scharf gewählt werden, dass auch solche Phasen des Zementsteins angegriffen werden, die bei den in der Praxis auftretenden höheren pH-Werten beständig wären. Beispielsweise können geeignet zusammengesetzte Betone nach [5] bei einem Säureangriff bis zu pH-Werten von ca. 3 bis 4 ohne Tiefenschädigung widerstehen. Wenn in der Praxis also mit höheren pH-Werten zu rechnen ist, sollte der pH-Wert des Prüfmediums auch nicht deutlich niedriger als pH-Wert 3 betragen, da ansonsten Schädigungen hervorgerufen würden, die in der Praxis nicht auftreten.

Neben dem pH-Wert ist der Säureangriff vor allem auch davon abhängig, wie der Ionenaustausch zwischen Säure und Betonoberfläche stattfinden kann. Hierfür ist es beispielsweise relevant, wie die Probe von der Säure umspült wird und somit reaktionsfähige Ionen an der Betonoberfläche zur Verfügung stehen und wie die Reaktionsprodukte abgetragen werden. Weiterhin sollte die Säure in regelmäßigen Abständen ausgetauscht werden, da die

Reaktionsfähigkeit der Säure mit zunehmender Menge von aus dem Beton gelösten Calciumionen reduziert wird [12].

Das Abtragen der Reaktionsprodukte kann zusätzlich durch eine abrasive Beanspruchung der Betonoberfläche unterstützt werden. In früheren Untersuchungen wie z.B. [13] wurde festgestellt, dass bei der chemischen Reaktion von Säure und Mörtel schwerlösliche Silikatgele entstehen können, die eine Schutzschicht bilden. Für einen weiteren chemischen Angriff müssen Ionen durch diese sich ausbildende Schutzschicht hindurch diffundieren. Die Geschwindigkeit des Angriffs wird dadurch deutlich gesenkt. Wird die Schutzschicht durch Abbürsten der Probekörper entfernt, kann der Angriff wesentlich schneller voranschreiten. Da es jedoch auch von Interesse sein kann, inwieweit die Reaktionsprodukte den Schadensfortschritt reduzieren, sollte sowohl ein abrasiver Angriff als auch ein Säureangriff ohne zusätzliches Abtragen der Reaktionsprodukte abgeprüft werden [12].

Bild 3 zeigt eine Systemskizze und Bild 4 eine Fotografie des entwickelten Prüfstands, bei dem die vorstehenden Überlegungen umgesetzt

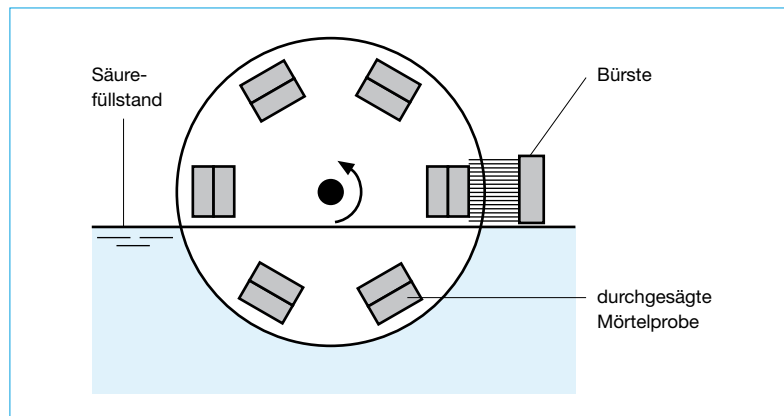


Bild 3: Systemskizze des neu entwickelten Säureprüfstands



Bild 4: Neu entwickelter Säureprüfstand mit in den Prüfstand integrierter Bürste bei aufgeklappter Abdeckung

wurden. Hauptziel bei der Konzeption des Prüfstands ist es, dass eine möglichst große Anzahl von Probekörpern unter gleichen Bedingungen geprüft wird. Um diese Anforderung zielsicher zu erfüllen, rotieren die Proben im Säurebad. Sollten sich innerhalb des Säurebeckens unterschiedliche Randbedingungen, z.B. hinsichtlich des pH-Werts, ausbilden, so würden dennoch aufgrund der Rotation alle Proben den gleichen Angriff erfahren. Die relativen Aussagen zwischen den Parametervariationen wären selbst dann noch möglich, wenn aufgrund unvorhergesehener Vorkommnisse die Prüfbedingungen, wie beispielsweise der pH-Wert, nicht exakt über die gesamte Prüfzeit gesteuert werden könnten. Über einen Motor wird eine Welle angetrieben, welche die Mörtelprismen im Kreis bewegt. Eine Umdrehung dauert dabei ca. 150 Sekunden. Alternativ zu den Mörteluntersuchungen sind auch

Untersuchungen an Betonproben (Abmessungen: ca. 3 cm x 7 cm x 15 cm) möglich. In diesem Fall reduzieren sich die Plätze gleichzeitig zu prüfender Proben von sechs auf vier.

Das Becken ist bis kurz unter der Welle mit einer wässrigen Säurelösung gefüllt. Über dem Säurespiegel werden die Proben auf einer Seite an einer Bürste vorbeigeführt, wodurch ein gleichmäßiges Abbürsten der Reaktionsprodukte erreicht wird. Ein Einfluss des Laboranten auf das Prüfergebnis durch unterschiedlich intensives Abbürsten der Prüfflächen ist somit ausgeschlossen. Eine vergrößerte Aufnahme der Bürste bei aufgeklappter Abdeckung ist ebenfalls Bild 4 zu entnehmen.

Die Probekörper werden in der Mitte durchgesägt, wobei die gesägten Flächen jeweils die Prüfflächen darstellen und außen liegen. Auf diese Weise können die Masseverluste der

abgebürsteten Prüffläche der äußeren Probenhälfte und die Masseverluste der inneren Probenhälfte, deren Prüffläche nicht gebürstet wird, miteinander verglichen werden.

#### 4 Auswertemethodik

Zur quantifizierten Bewertung des Säurewiderstands unterschiedlicher Mörtelzusammensetzungen können verschiedene Kriterien herangezogen werden. Mögliche Kriterien sind die Korrosionstiefe oder Säureeindringtiefe (Tiefe der Decalzifizierung), Masseänderung, Volumenänderung, die Beeinflussung der Festigkeit oder die Stoffkonzentration in der angreifenden Lösung [12].

Wenn geringe Eindringtiefen bzw. Korrosionsraten erwartet werden, stellen Massen- und Volumenänderung unzureichend präzise Messgrößen dar. Bei den durchgeführten

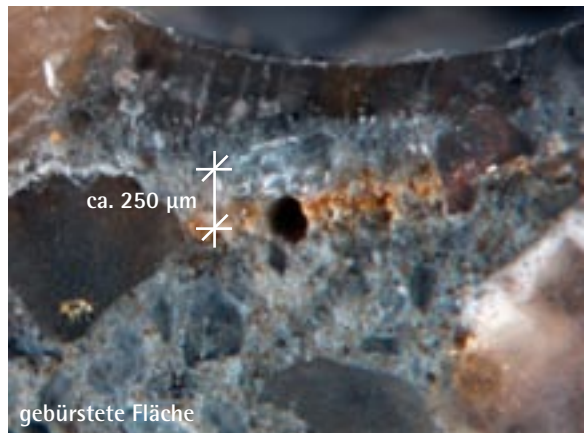
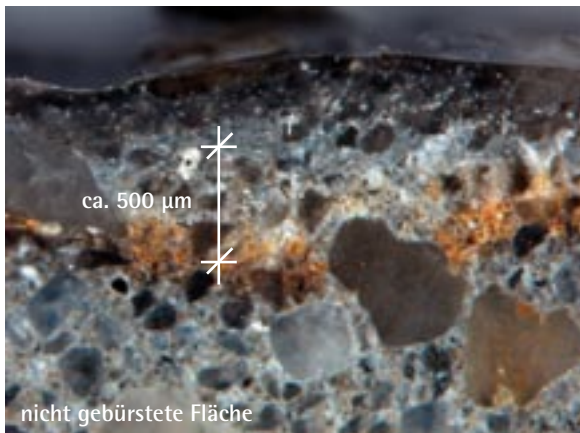


Bild 5: Auflichtmikroskopie an Anschliffen einer nicht gebürsteten Fläche (links) und einer gebürsteten Fläche (rechts)

Untersuchungen stellte die Bestimmung der Säureeindringtiefe oder der Schädigungstiefe das zentrale Beurteilungskriterium dar.

Die Säureeindringtiefe kann anhand der Färbung der Matrix oder auch durch Besprühen mit einer pH-Indikatorlösung an einer Bruchfläche meist visuell erkannt und gemessen werden. Bei entsprechend großen Eindringtiefen kann dies hinreichend genau bei geringer mikroskopischer Vergrößerung erfolgen. Bei geringen Schädigungstiefen und noch geringeren Unterschieden zwischen zu vergleichenden Betonzusammensetzungen können diese jedoch nur im Mikroskop festgestellt werden.

Die mikroskopische Untersuchung erfolgt in erster Linie an Dünn- oder Anschliffen der säuregeschädigten Probe (Hellfeld und Polarisation) und kann zum Beispiel durch Rasterelektronenmikroskopie (REM) ergänzt werden. Grundsätzlich sind für die unterschiedlichen Untersuchungen auch unterschiedliche Probenvorbereitungen erforderlich. Zu Demonstrationszwecken und zum Zwecke einer besseren Vergleichbarkeit der verschiedenen mikroskopischen Verfahren wird teilweise

derselbe Ausschnitt der geschädigten Randzone einer Mörtelprobe verwendet. Damit die unterschiedlichen Mikroskopieuntersuchungen am gleichen Bildausschnitt durchgeführt werden konnten, war eine für das jeweilige mikroskopische Verfahren optimierte Probenvorbereitung nicht möglich (z. B. Bedampfen der Probe mit Gold für die Rasterelektronenmikroskopie). Daher müssen Einschränkungen, beispielsweise in der Bildschärfe, in Kauf genommen werden.

#### 4.1 Auflichtmikroskopie

Um einen Überblick über die Schädigung der Probekörper zu erlangen, eignet sich die Auflichtmikroskopie an Anschliffen. Bild 5 zeigt einen Ausschnitt aus der geschädigten Randzone. Im oberen Teil des Bildes erkennt man das Reaktionsharz, das zur Fixierung der gestörten Randzone dient. Im Schädigungsbereich der Probe sind unterschiedliche Zonen zu erkennen, wobei sich in der Abbildung in erster Linie die helle Randzone erkennen lässt. An dem Vergleich zwischen gebürsteter und ungebürsteter Fläche ist deutlich der Einfluss der abrasiven Beanspruchung zu erkennen. Während an

der nicht gebürsteten Probe (Bild 5 links) eine relativ dicke Schicht des geschädigten Materials erhalten geblieben ist, ist diese Schicht bei der gebürsteten Probe (Bild 5 rechts) deutlich dünner. Diese Art der Mikroskopie lässt eine helle geschädigte Zone erkennen, an die sich ein braunes Band anschließt.

#### 4.2 Durchlichtmikroskopie mit Polarisationsfilter

Nach den Anschliffen wurden Dünnschliffe im Durchlichtmikroskop untersucht. Bild 6 zeigt einen Probenausschnitt im Polarisationsmikroskop. Dabei sind ebenfalls unterschiedliche Zonen zu erkennen. Die Ausbildung unterschiedlicher Zonen beim Säureangriff wurde bereits mehrfach beobachtet [14]. Hinter einer hellen Zone mit amorphem silikatischen Material, die deutliche Gefügaufösungen zeigt, folgt eine leicht bräunliche Zone. Dann folgt ein helles Band. Hinter diesem Band folgt, wie die weiteren Untersuchungen gezeigt haben, die nicht säuregeschädigte Zementsteinmatrix. Diese Grenze ist unter dem Polarisationsmikroskop gut zu erkennen.

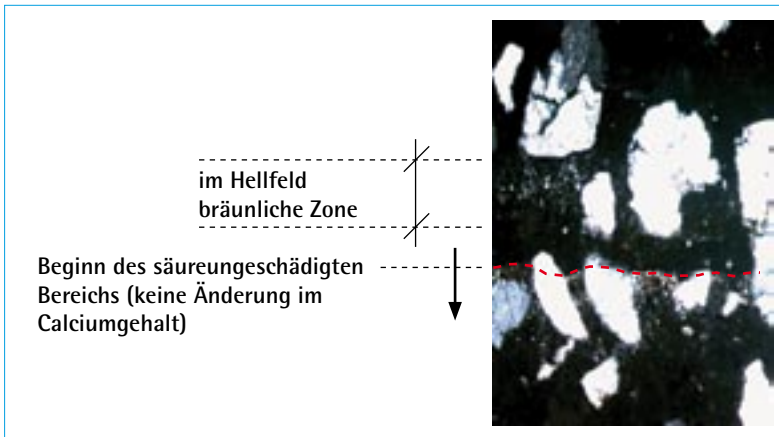


Bild 6: Polarisationsmikroskopie

### 4.3 Rasterelektronenmikroskopie (REM) und Energy Dispersive X-Ray (EDX)

Bild 7 zeigt den zuvor in Bild 6 gezeigten Polarisationsmikroskopieausschnitt im REM. Oben sind die Einflüsse der Epoxidharztränkung zu sehen. Eine äußere Grenze ist kaum auszumachen. Der in der lichtmikroskopischen Untersuchung bräunliche Bereich tritt hier hell hervor. Hinter dem hellen Bereich folgt noch ein dunkleres Band, bis dann die Grenze zum ungeschädigten Bereich erkennbar ist. Weiter in die Tie-

Bildausschnitt aus den Bildern 6 u. 9

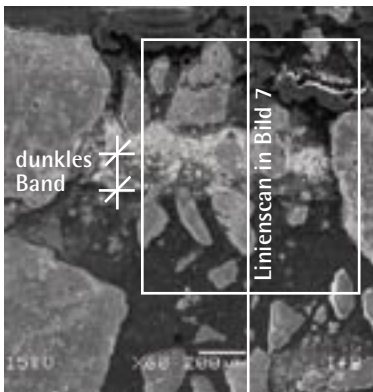


Bild 7: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme

fe ändert sich das Erscheinungsbild der Zementsteinmatrix nicht mehr.

Um die Unterschiede in der Zusammensetzung der einzelnen Zonen zu erfassen, wurden Untersuchungen mit dem EDX durchgeführt. Dabei sollte auch die Lage von Eindring- oder Schädigungsfronten nachgewiesen werden. In diesem Zusammenhang kann ein erhöhter Schwefelgehalt als Indikator für das Eindringen der Schwefelsäure in den Beton betrachtet werden [15]. Bei den durchgeführten Untersuchungen zeigte das EDX-Spektrum

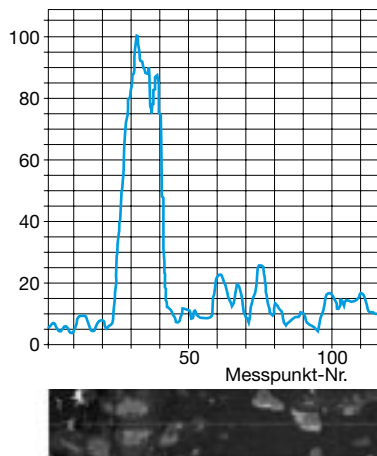


Bild 8: EDX-Linienscan Schwefel

insgesamt einen hohen Schwefelgehalt. Das Vordringen und die Lage der Schwefelfront werden durch Bild 8 belegt. Zu sehen ist ein mehrere Millimeter langer Linien-scan von der geschädigten Außenseite in den ungeschädigten Bereich hinein. Der obere Teil des Bildes zeigt eine Zone markanter Schwefelanreicherung. Diese Analyse belegt eindeutig, dass die Schwefelsäure bis zu einer definierbaren Tiefe eingedrungen ist. Bild 8 gibt aber keinen Aufschluss darüber, ob die Schwefelfront gleichbedeutend mit der mikroskopisch erkannten Schädigungsfront ist.

Dieses wird aber mit Hilfe der Visualisierung der chemischen Elementverteilung mittels EDX-Mappings sichtbar. Hierzu ist in Bild 9 zu dem bereits diskutierten Bildausschnitt EDX-Mapping mit den Elementen dargestellt, denen verschiedene Farben zugeordnet wurden. Auch in dieser Aufnahme sind die Gesteinskörner klar zu erkennen. Die eindimensionale Information des Linien-scans aus Bild 8 findet sich auch in der zweidimensionalen Information wieder. Es ist eindeutig ein Band mit hoher Schwefelkonzentration zu erkennen. Das EDX-Mapping zeigt aber auch eindeutig, dass hinter der Schwefelfront noch nicht der ungeschädigte Bereich beginnt. Der nicht durch Säure geschädigte Bereich beginnt erst dort, wo der Calciumgehalt des ungeschädigten Zementsteins vorliegt. Diese Grenze wird für die Vergleichsuntersuchungen als Schädigungstiefe definiert.

Bei anderen Mörtelzusammensetzungen und anderen Versuchsrandbedingungen zeigen sich leicht unterschiedliche Erscheinungsbilder in den mikroskopischen Untersuchungen. Bei einer Erstuntersuchung und in Zweifelsfällen sollte daher durch die Kombination der vorge-

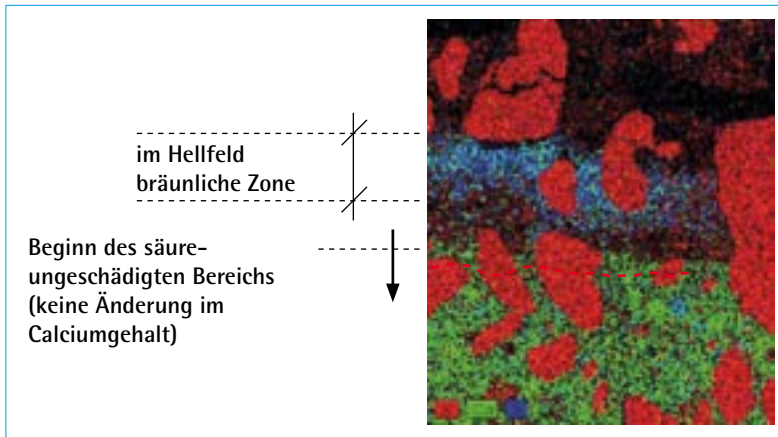


Bild 9: EDX-Mapping zu den Bildern 7 und 8

stellten mikroskopischer Untersuchungen und EDX-Scans die Definition der Schädigungstiefe verifiziert werden.

## 5 Säurewiderstand von Betonzusammensetzungen mit Hochofenzement und Flugasche

Mit dem oben beschriebenen Prüfstand für Parameterstudien zum Säurewiderstand wurden auch Untersuchungen mit unterschiedlichen Betonzusammensetzungen aus Hochofenzement, kombiniert mit

Flugasche bzw. Feinstflugasche, durchgeführt. Dabei wurden diese Untersuchungen stets vergleichend zu dem bislang in Niederaußem eingesetzten Hochleistungs- beton mit erhöhtem Säurewiderstand durchgeführt. Dort wurde, wie oben bereits erwähnt, eine Kombination aus Portlandzement, Flugasche und Mikrosilika verwendet.

Bei den Hochofenzement-Flugasche-Kombinationen wurde als Flugasche auch eine so genannte Feinstflugasche eingesetzt, die aus herkömmlicher Flugasche durch Trennen bzw. Sichten der Feinstbestandteile gewonnen wird.

Exemplarisch werden die Ergebnisse zur Schädigungstiefe von sechs Mörtelzusammensetzungen vergleichend gegenübergestellt.

- C1: Portlandzement + Flugasche + Mikrosilika
- C2: CEM III/A 52,5 N + Feinstflugasche
- C3: CEM III/A 52,5 N + Flugasche + Feinstflugasche
- C4: CEM III/A 52,5 N + Flugasche + Mikrosilika
- C5: CEM III/A 42,5 R + Flugasche + Mikrosilika
- C6: CEM III/A 42,5 R + Feinstflugasche + Mikrosilika

Da es sich bei diesen Untersuchungen um vergleichende Untersuchungen zwischen den Kombinationen aus Zement und verschiedenen Betonzusatzstoffen handelt, wurden sie nicht am Beton, sondern an Mörtelproben durchgeführt. Dabei wurden die Mörtel entsprechend den in **Tafel 1** angegebenen Mengen zusammengesetzt. Der Gehalt der Gesteinskörnung im Mörtel wurde in Anlehnung an den Normmörtel nach DIN EN 196 – 1 gewählt. Die aus diesen Untersuchungen abgeleiteten Erkenntnisse können unter Berücksichtigung der optimierten Packungsdichte der Gesteinskörnung

Tafel 1: Angaben zur Zusammensetzung der Mörtel für die Säurewiderstandsuntersuchungen

Mörtelkennzeichnung		C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6
Zementart und Festigkeitsklasse		CEM I 42,5 R	CEM III/A 52,5 N	CEM III/A 52,5 N	CEM III/A 52,5 N	CEM III/A 42,5 R	CEM III/A 42,5 R
Zementgehalt	kg/m <sup>3</sup>	248	270	270	270	270	270
Wassergehalt (w/z) <sub>eq</sub>	kg/m <sup>3</sup>	125	125	125	125	125	125
Betonzusatzstoff Art		SFA 1 <sup>1)</sup> MS <sup>2)</sup>	Feinst-SFA	SFA 1 Feinst-SFA	SFA 1 MS	SFA 1 MS	SFA 2 MS
Gehalt	kg/m <sup>3</sup>	74 28	80	50 30	70 10	60 20	60 20

<sup>1)</sup> Steinkohlenflugasche

<sup>2)</sup> Mikrosilika

unmittelbar auf den Beton übertragen werden.

Da es sich bei allen sechs Kombinationen von Zement und Zusatzstoffen um speziell hinsichtlich eines erhöhten Säurewiderstands konfigurierte Zusammensetzungen handelt, sind die Unterschiede in ihrer Leistungsfähigkeit zu gering, als dass sie anhand der Abwitterungen erkennbar wären. Die Ergebnisse der Abwitterungen der außen liegenden, gebürsteten Proben und der innen liegenden ungebürsteten Proben sind **Bild 10** zu entnehmen. Zunächst nehmen die Proben an Masse zu. Dieser Effekt ist nicht unbekannt

[12] und ist auf die Bildung von Reaktionsprodukten zwischen dem Zementstein und der sauren Prüflösung zurückzuführen, die zunächst noch an den Proben verbleiben. Mit zunehmender Prüfdauer werden die Reaktionsprodukte offensichtlich von den Proben abgelöst. Dabei ist der Unterschied zwischen den gebürsteten Proben, die größere Masseverluste aufweisen, und den ungebürsteten Proben zu erkennen.

Anhand der mikroskopisch ermittelten Schädigungstiefen können jedoch Unterschiede zwischen den Parametervariationen erfasst werden. Im **Bild 11** sind die Ergebnisse zur

Schädigungstiefe abgebildet. Dabei wurde je Mörtelzusammensetzung die gebürstete und die ungebürstete Fläche getrennt voneinander untersucht und ausgewertet.

Diese Ergebnisse zeigen, dass neben der im Rahmen der Erstanwendung für einen unbeschichteten Kühlturm aus Hochleistungsbeton verwendete Betonzusammensetzung auch mit anderen betontechnologischen Vorgehensweisen ein vergleichbarer oder sogar höherer Säurewiderstand erreicht werden kann. Es sei jedoch an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass ein Beton für den Kühlturmbau neben dem Säurewiderstand auch noch weitere hohe Anforderungen, beispielsweise an den Frost-Tausalz-Widerstand, erfüllen muss, die bei der Auswahl eines geeigneten Betons ebenfalls zu berücksichtigen sind.

Darüber hinaus sollte der Beton auch im hohen Alter eine nicht zu hohe Druckfestigkeit aufweisen, da andernfalls der für die Rissbreitenbeschränkung erforderliche Bewehrungsgehalt deutlich erhöht werden müsste.

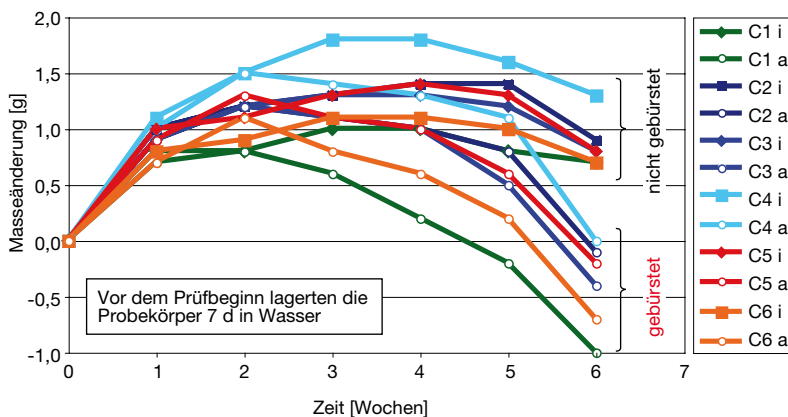


Bild 10: Massenänderungen der Proben im Rahmen der Säurewiderstandsprüfungen

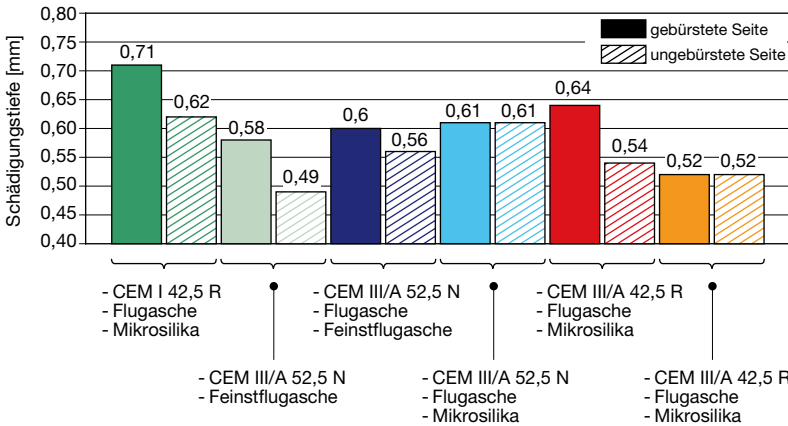


Bild 11: Schädigungstiefen der gebürsteten (links) und ungebürsteten Proben (rechts)

## 6 Zusammenfassung

Derzeit stellt der Einsatz von Betonen mit erhöhtem Säurewiderstand beim Bau von unbeschichteten Kühltürmen mit Rauchgaseinleitung eine der höchsten Anforderungen an die Leistungsfähigkeit von Betonen dar. Die mit dem Abgas vermischten Kühlwasserschwaden kondensieren an der Kühlturmschale. Dabei entsteht ein saures Medium, das regelmäßig niedrige pH-Werte von ca. 3,5, gelegentlich auch noch darunter, aufweist. Neben dem geringen pH-Wert führt das Herabfließen des Kondensats an der Schaleninnenseite zu einer Verschärfung des chemischen Angriffs.



Bei der Erstanwendung eines unbeschichteten Kühlturms mit Abgasleitung unter Einsatz eines Hochleistungsbetons mit erhöhtem Säurewiderstand kam eine Kombination aus Portlandzement, Flugasche und Mikrosilika zur Ausführung. Abweichungen von dieser Zusammensetzung galten bislang als problematisch hinsichtlich des erforderlichen hohen Säurewiderstands.

Neueste Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass es zu dieser Betonzusammensetzung durchaus zahlreiche Alternativen gibt, die teilweise sogar höheren Säurewiderstand aufweisen als die bislang eingesetzte Zusammensetzung mit CEM I.

Im vorliegenden Bericht wurde zunächst ein neuartiger Prüfstand vorgestellt, mit dem Parameteruntersuchungen zum Säurewiderstand durchgeführt werden können. Mit Hilfe dieses Prüfstands kann der Säurewiderstand von bis zu sechs Parametervariationen vergleichend beurteilt werden. Für derartige Beurteilungen sind dabei sowohl lichtmikroskopische als auch rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen einschließlich EDX-Analysen erforderlich. Die unterschiedlichen mikroskopischen Untersuchungen zur Erfassung der Schädigungstiefe wurden ausführlich diskutiert.

Exemplarisch wurden im vorliegenden Bericht vergleichende Untersuchungen zum Säurewiderstand der bekannten Kombination aus Portlandzement, Flugasche und Mikrosilika gegenüber Hochfenzement kombiniert mit Flugasche und Feinstflugasche vorgestellt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, dass der Einsatz von Hochfenzement in Verbindung mit Flugasche und Feinstflugasche durchaus zu einem vergleichbaren oder sogar höheren Säurewiderstand führen kann.

Der Frost-Tausalz-Widerstand und eine moderate Nacherhärtung sind jedoch ebenfalls wichtige Kenngrößen, die ein geeigneter Kühlturbeton erfüllen sollte. Diese Anforderungen lassen sich auch mit Hochfenzement erfüllen, sollten aber in jedem Fall überprüft werden. Hierauf sollte daher bei der Entwicklung von Zusammensetzungen für Hochleistungsbetone mit erhöhtem Säurewiderstand für den unbeschichteten Kühlturbau ein erhöhtes Augenmerk gelegt werden.

## 7 Literatur

- [1] Petersen, L.; Lohaus, L.; Griesse, R.: Concrete technological prerequisites for enduring concrete cooling towers. 3rd International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation, 10.-12. September 2007 in Cape Town, South Africa.
- [2] Lohaus, L.: High-performance concrete – An alternative to coatings? In: Wittek, U.; Krätzig, W. B. (eds.): Natural Draught Cooling Towers. A. A.-Balckema, Rotterdam 1996, S. 207-213.
- [3] Hüttl, R.; Hillemeier, B.: Hochleistungsbeton: Beispiel Säureresistenz. Betonwerk und Fertigteil-Technik 66 (2000) Nr. 1, S. 52-60.
- [4] Breit, W.: Säurewiderstand von Beton. beton 52 (2002) Nr. 10, S. 505-510.
- [5] Hillemeier, B.; Buchenau, G.; Herr, R.; Hüttl, R.; Klüßendorf, S.; Schubert, K.: Spezialbetone. Beton Kalender 2006, Berlin, S. 519-584.
- [6] Kleingart, W.; Bangert, W.: Naturzugkühler Ibbenbüren. Beton-Informationen 6 (1966) H. 6, S. 106-107.

- [7] Wandschneider, R.: Naturzugkühler in Stahlbetonbauweise. Beton-Informationen 10 (1970) H. 6, S. 79-85.
- [8] Erdmann, W.: Kühltürme – Aufgaben, Verfahren, Bauarten, Ausführung. Beton-Informationen 16 (1976) H. 5, S. 70-77.
- [9] Wandschneider, R.; Bangert, W.: Beton für Naturzugkühltürme. Beton-Informationen 19 (1979) H. 4, S. 38-47.
- [10] Menze, W.: Beispiel für dauerhaften Stahlbeton: Naturzugkühltürme von Braunkohlekraftwerken. Beton-Informationen 27 (1987) H. 1, S. 8-14.
- [11] Petersen, L.; Lohaus, L.: Entwicklung eines Prüfstandes für Parameterstudien zur Säurebeständigkeit von Hochleistungsbetonen. 16. Internationale Baustofftagung ibausil, Bauhaus-Universität Weimar, Tagungsbericht, Band 2, September 2006.
- [12] Rendchen, K.: Beton mit hohem Widerstand gegen chemischen Angriff in Abwasserkanälen. Beton-Informationen 41 (2001) H. 5, S. 14-23.
- [13] Grube, H.; Rechenberg, W.: Betonabtrag durch chemisch angreifende Wässer. beton 37 (1987) Nr. 11, S. 446-451 und Nr. 12, S. 495-498.
- [14] St. John, D. A.; Poole, A. B.; Sims, I.: Concrete Petrography – A handbook of investigative techniques. Arnold, London 1998.
- [15] Chang, Z.-T.; Song, X.-J.; Munn, R.; Marosszeky, M.: Using limestone aggregates and different cements for enhancing resistance of concrete to sulphuric acid attack. Cement and Concrete Research 35 (2005), S. 1468-1494.

# Hochleistungsbetone mit erhöhtem Säurewiderstand für den Kühlturmbau

Von Ludger Lohaus und Lasse Petersen, Hannover

Auf Grund mehrfacher Nachfragen haben wir im oben genannten Beitrag bei der Kennzeichnung der Zementarten im Text und in Tafel 1 auf Seite 77 und in der Unterschrift zu Bild 11 auf Seite 78 die besonderen Eigenschaften ergänzt, damit die Versuchsergebnisse besser eingeordnet werden können.

In diesem Zuge haben wir auch in Bild 11 auf Seite 78 die Schädigungstiefe der gebürsteten Probe von C 6 korrigiert, die 0,61 mm beträgt.

- C1: CEM I 42,5 R-**HS/NA** + Flugasche + Mikrosilika
- C2: CEM III/A 52,5 N-**HS/NA** + Feinstflugasche
- C3: CEM III/A 52,5 N-**HS/NA** + Flugasche + Feinstflugasche
- C4: CEM III/A 52,5 N-**HS/NA** + Flugasche + Mikrosilika
- C5: CEM III/A 42,5 R-**NA** + Flugasche + Mikrosilika
- C6: CEM III/A 42,5 R-**NA** + Feinstflugasche + Mikrosilika

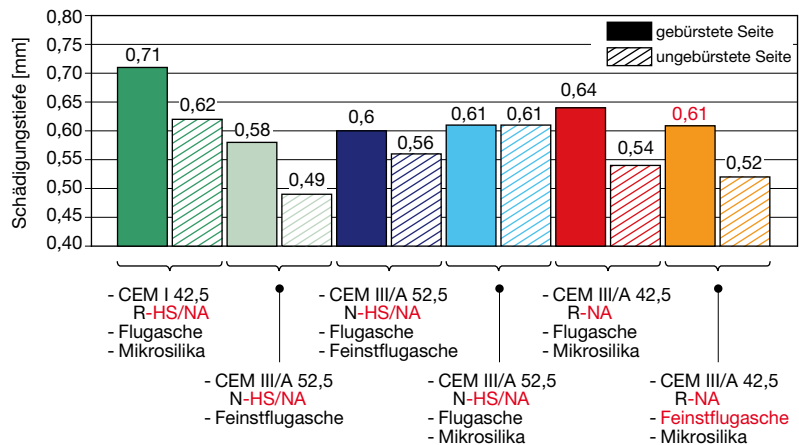


Bild 11: Schädigungstiefen der gebürsteten (links) und ungebürsteten Proben (rechts)

Tafel 1: Angaben zur Zusammensetzung der Mörtel für die Säurewiderstandsuntersuchungen

Mörtel-kennzeichnung		C 1	C 2	C 3	C 4	C 5	C 6
Zementart und Festigkeits-klasse		CEM I 42,5 R- <b>HS/NA</b>	CEM III/A 52,5 N- <b>HS/NA</b>	CEM III/A 52,5 N- <b>HS/NA</b>	CEM III/A 52,5 N- <b>HS/NA</b>	CEM III/A 42,5 R- <b>NA</b>	CEM III/A 42,5 R- <b>NA</b>
Zementgehalt	kg/m <sup>3</sup>	248	270	270	270	270	270
Wassergehalt (w/z) <sub>eq</sub>	kg/m <sup>3</sup>	125	125	125	125	125	125
Beton-zusatzstoff							
Art		SFA 1 <sup>1)</sup> MS <sup>2)</sup>	Feinst-SFA	SFA 1 Feinst-SFA	SFA 1 MS	SFA 1 MS	Feinst-SFA MS
Gehalt	kg/m <sup>3</sup>	74 28	80	50 30	70 10	60 20	60 20

<sup>1)</sup> Steinkohlenflugasche <sup>2)</sup> Mikrosilika